

# 압전세라믹 감지기와 작동기를 이용한 방진 시스템 개발

허 석<sup>†</sup>, 콧문규<sup>\*</sup>

## Development of the Vibration Isolation System using Piezoceramic Sensors and Actuators

Seok Heo, Moon K. Kwak

### Abstract

This paper is concerned with the development of the vibration isolation system using piezoelectric actuators and sensors. The active vibration absorber system consists of 4 pairs of PZT actuators bonded on aluminium plates. Hence, the active system is directly connected to the passive system. The rubber attached to the end of the beam is connected to the upper base as a structural member. It allows bending thus maximizing the vertical movement generated by the piezoceramic actuators. The piezoceramic sensors consists of 4 PZT sensors known to tilting, rolling and vertical movement. This paper also presents the development and the movement of the system.

### 1. 서 론

다양한 진동원에 노출되어 있는 비정제 탑재장비를 외부 가진원으로부터 보호하고 성능을 보장하기 위해서는 기존의 수동형 마운트로 부족하다. 따라서 장비의 탑재위치, 장착부 강성, 외부 교란에 스스로 적응하여 탑재 장비를 보호할 수 있는 능동 마운트의 개발이 필요하다. 능동마운트의 개발을 위해서는 외부 교란에 대처할 능력을 갖추고 있는 작동기 개발이 선행되어야 한다. 본 연구의 첫 번째 목적은 작동기로서 그 성능을 입증받은 압전체를 이용하여 능동 마운트를 개발하는 것이

고 두 번째 목적은 압전형 능동 마운트를 효과적으로 작동하기 위한 제어 알고리즘의 개발이다.

일반적으로 외부 또는 내부로부터의 진동을 작동기를 사용하여 능동적으로 격리하는 것을 능동진동격리(Active Vibration Isolation, AVI)라고 부른다. 이 기술은 한 물체 또는 구조물로부터 다른 물체로의 진동 전달을 감소시키기 위하여 능동시스템을 사용하는 것을 지칭하며 포괄적으로는 능동진동흡수장치(Active Vibration Absorber)를 사용하여 기계나 구조물의 진동을 감소시키는 것을 포함한다.

능동진동흡수장치의 장점과 단점을 열거하면 다음과 같다. 먼저 지지된 장비의 정적 안정성이 수동진동격리(Passive Vibration Isolation, PVI)에 비해

<sup>†</sup> 동국대학교 기계공학과 대학원

<sup>\*</sup> 동국대학교 기계공학과 교수

종모며 저주파수 대역에서의 성능이 좋다. PVI는 저주파수 대역에서 진동제어 효과가 거의 없다. AVI는 어느 한 지점의 진동제어가 가능하며 장비의 작동 상태에 맞추어 교정이 가능하다. 그러나 에너지를 받출 또는 제공하기 위해서 외부 전원이 필요하다는 단점이 있다. 따라서 진동억제에 비용이 많이 들며 장비가 강철과 고무스프링으로 되어 있는 단순한 PVI 시스템에 비해 복잡하다. 내구성 역시 문제가 된다.

능동진동흡수시스템은 현재 지지구조물의 진동으로부터 광학시스템의 격리, 기진 노면으로부터 발생된 타이어 진동으로부터 객실 격리, 기진원으로부터 우주 망원경의 격리, 엔진 진동으로부터 차량의 격리, 로터 기어박스 진동으로부터 헬리콥터 객실의 격리, 중장비 진동으로부터 지면 격리 등에 사용되고 있다.

진동흡수장치를 사용하는 진동격리는 크게 두 가지로 분류할 수 있다. 하나는 지지구조물로부터 장비를 격리하는 것, 즉 베이스 기진력으로부터 장비를 격리하는 것이고 다른 하나는 장비 진동을 지지부로부터 격리하는 것이다.

본 연구에서는 베이스에 저주파수 특성을 가지는 외부 교란이 가해지는 경우에 대응할 수 있는 수동-능동 진동흡수기의 설계 제작, 그리고 3자유도로 감지되는 값지기 데이터를 처리하여 자동기의 제어성능을 알아보고자 한다. 본 연구에서 제안한 시스템은 수동시스템과 병렬로 연결된 능동시스템이다.

Karnopp[1]는 능동/반능동 진동격리장치에 대해 논하면서 특히 "sky hook" 알고리즘에 대해 소개하고 있다. 이 논문에서 진동격리장치를 자전에 대한 격리대의 설계 방법과 자동차의 능동현가장치, 반능동 감쇠현가장치에 대해 논하고 있다. Leo와 Inman[2]은 수동-능동 고립진동시스템에 대한 최적 제어문제를 다루었으며, Flint등[3]은 교란에 대응하는 제어력을 이용하는 방법을 다루었다. Flangas[4]는 PZT 판을 부착한 S-bracket을 개발하고 H<sub>2</sub> 제어를 이용한 성능해부에 대하여 논하였다.

다. Andersson등[5]은 인공위성의 통신 장비 지지대의 조성된 능동진동 제어 장치(SLITE)에 대한 실험방법과 특성에 대하여 논하고 있다.

## 2. 방진 시스템의 개발

개발된 방진 시스템(Fig. 2)은 기존에 개발한 Fig. 1과 같은 형태이지만, 가운데를 기준으로 시각형태로 만들어 졌다.

개발된 시스템의 구성은 수직방향으로 변위가 발생되도록 얇은 알루미늄 판에 압전세라믹을 위 아래로 접착하여 극방향으로 진압이 가해졌을 때 Fig. 1에서 보이듯이 뒷면의 알루미늄판은 인장을 하고, 앞면의 알루미늄판은 압축을 하게 되어 전체적으로 굽힘이 일어나고 이로 인해 뒷판이 수직방향으로 움직이게 된다.

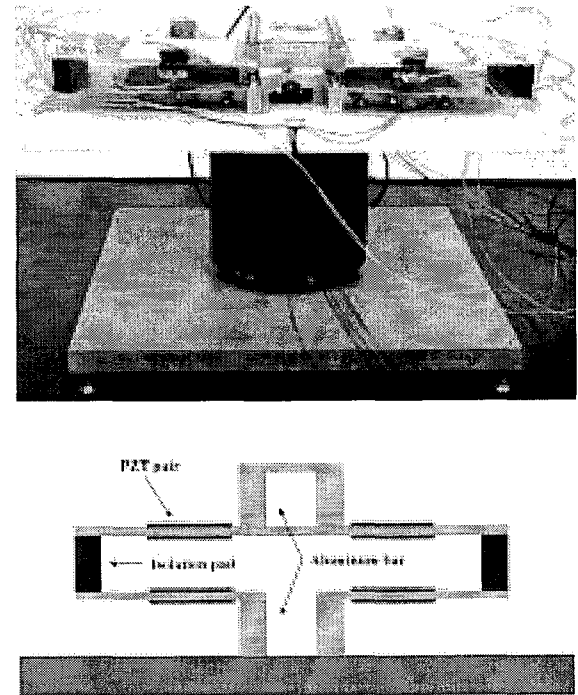


Fig. 1 Active Vibration Isolation System

아래에 있는 베이스에 연결된 적어는 부분은 알루미늄 마를 분트와 너트를 이용하여 고정하였고, 알루미늄판과 판 사이는 NOVITECH 사의 방진고부

(NYCOTOP series)를 이용하여 연결하였다. 이는 작동기에서 발생하는 굽힘의 방향을 상·하 방향으로만 사용하기 위한 방책으로 방진고부의 부족으로 인하여 좌우로 발생하는 운동방향을 고부자체의 연성으로 서로 상쇄 시켜주는 역할을 하게된다. 작동기로 사용되는 압전세라믹은 알루미늄마에 근접하여 부착함으로써 작동기에서 발생하는 변위를 최대한 이용할 수 있도록 설계하였다. 방진고부와 알루미늄판과의 부착, 압전세라믹과 알루미늄판과의 부착은 DEVCON 사의 30분 경화용 에폭시를 사용하였다. 이후 압전스택형으로 만들기 쉽도록 상부에 하부와 마찬가지로 알루미늄 마를 붙트와 너트를 이용하여 고정함으로써 최종적인 능동 진동 제어장치를 완성하였다. 실험에 사용한 압전세라믹은 Piezo Systems 사의 PZT-PSI-5H-S3로서 압전상수  $d_{31} = -260 \times 10^{-12} \text{ m/V}$ , 두께  $t_p = 14.48 \times 10^{-3} \text{ m}$ , 폭과 넓이는 각각 55mm이다. Fig. 1에 대한 능동진동제어를 수행한 결과 만족할만한 제어성능을 확인할 수 있었다.

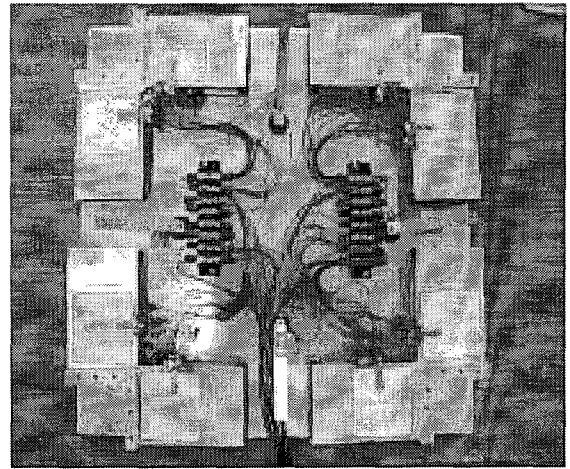
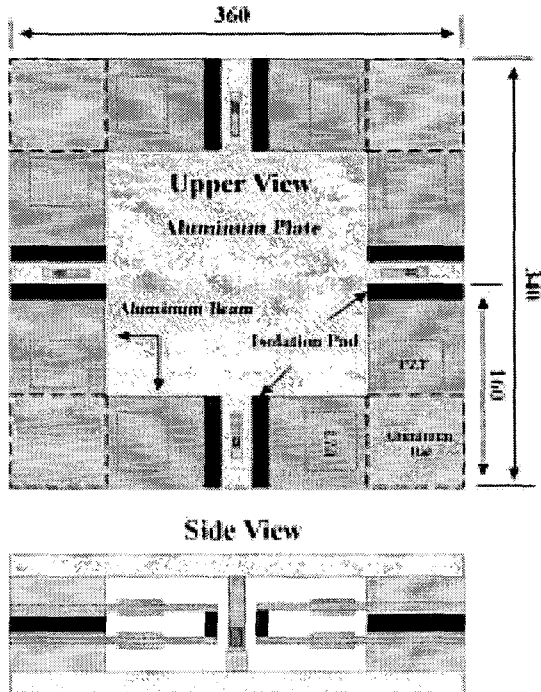


Fig. 2 Active Vibration Isolation System

Fig. 2는 앞에서의 성능 확인결과를 바탕으로 정방형의 판에 네 개의 작동기와 네 개의 감지기를 부착한 것을 보여주고 있다. 그림을 보면 하나의 작동기는 압전세라믹이 모두 4-pair, 8장으로 이루어져 있으며 압전세라믹이 부착된 알루미늄판들은 방진고부와 연결되어 하나의 시스템을 이룬다. 앞에서 설명하였던 수동부와 능동부의 병렬시스템을 이루고 있다. 이러한 하나의 작동기 시스템을 정방형 판의 각 모서리에 위치시켜 상판을 지지할 수 있도록 하였다. 이로 인하여 작동기는 3자유도 (Tilting, Rolling, vertical movement)의 운동을 가능하게 한다.

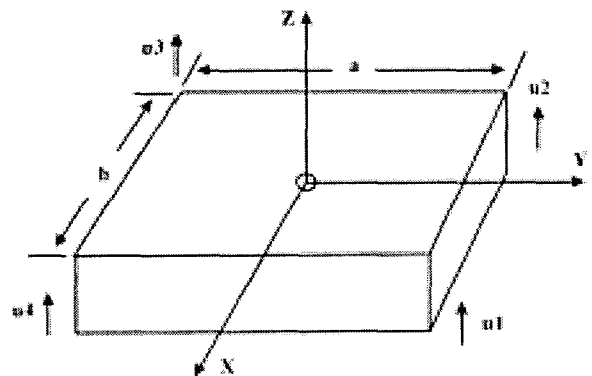


Fig. 3 Schematic of Diagram

위의 도식화된 그림을 살펴보면 세종류의 운동을 예상할 수 있는데 각 모서리에 위치한 작동기의 변위  $u1-u4$ 가 모두 Z 방향으로 운동을 하려면 길

은 신호를 가진 네 개의 작동기가 함께 움직여야만 가능하다. 하나의 작동기라도 synchronized된 신호가 들어오지 않을 경우 수직운동을 발생시키기 어렵다. Fig. 2에서도 볼 수 있듯이 각각의 작동기가 독립적으로 운동을 할 수 있으므로 주의하여야 한다. 또한, X축을 기준으로 rolling을 하려면  $u1$ 과  $u2$ 는 같은신호를  $u3$ 와  $u4$ 도 같은신호를 갖지만  $u1$ 과  $u2$ 의 역신호를 입력받아야만 한다. 그리고, Y축을 기준으로 tilting의 운동은  $u2$ 와  $u3$ 는 같은신호를,  $u1$ 과  $u4$ 가 같은신호이지만  $u2$ ,  $u3$ 의 역신호를 입력받아야만 한다. 간단한 식으로 나타내면 다음과 같다.

$$R_z = \frac{u_1 + u_2 + u_3 + u_4}{4}$$

$$\theta_x = \frac{(u_1 + u_2) - (u_3 + u_4)}{2a} \quad (1)$$

$$\theta_y = \frac{(u_2 + u_3) - (u_1 + u_4)}{2b}$$

수직운동을 할 경우에는  $R_z$  만이 존재하며, tilting에서는  $\theta_y$ 만 나타나고, rolling은  $\theta_x$ 만 나타나게 된다.

감지기는 Fig. 4에서처럼 각각의 면 중앙에 네 개의 감지기를 위치시켜 모든 운동방향에 대하여 감지할 수 있었다. 감지기는 0.5mm 두께의 스테인레스 재질의 외판보로 한편의 끝단에 압전세라믹을 부착하여 비스듬히 기울인 형태로 다른 끝단이 상판과 닿게하였다. 아래 그림이 최종적으로 상판과 연결되어 완성된 형태를 보여준다.

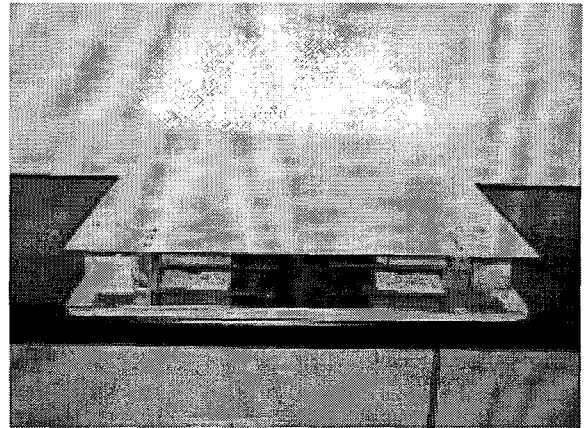
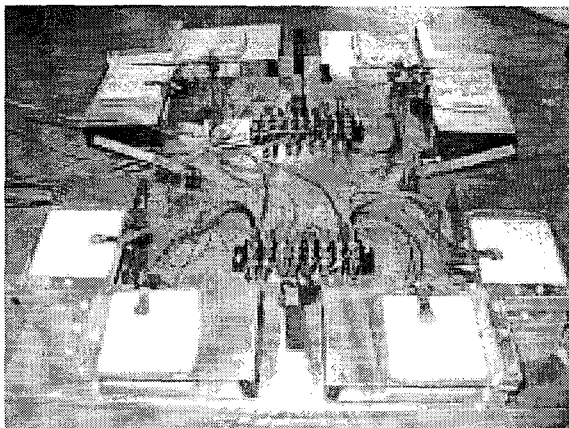


Fig. 4 Active Vibration Isolation System

앞서 말한 세가지의 운동을 보이기 위한 실험을 수행했는데, 네 개의 작동기 시스템의 신호와 네 개의 감지기 신호를 입력하기 위해서 DSP 보드를 사용하였다. dsSPACE사의 DS1102를 펜티엄 PC에서 구동되어 있는데 감지기로부터 받은 신호는 4ch 전하앰프를 통해서 DS1102를 내장한 PC와 연결되며 DSP프로그램을 통해서 세가지 운동에 대한 가진신호가 각각의 작동기에 증폭앰프를 통해서 입력되어진다.

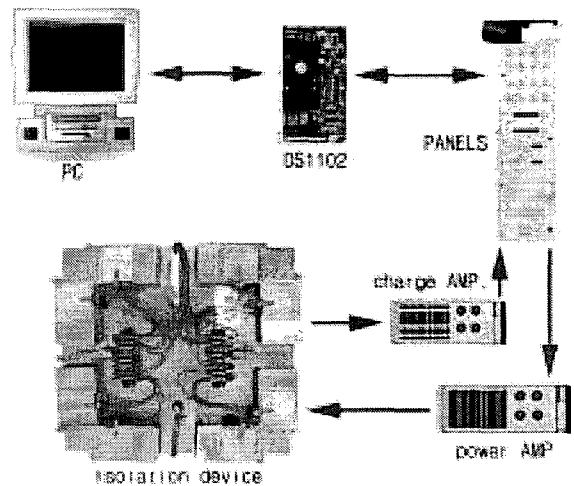


Fig. 5 Schematic of Set-up

최종적으로 외부에서 전달되는 진동원으로부터 진동흡수장치를 거쳐 전달되는 상부의 진동을 측정하여 제어원으로서 진동흡수장치의 성능을

밝히고자 하는 실험을 수행하였다.

#### 4. 토의 및 결론

본 연구에서는 수동-능동 압전형 진동흡수장치를 개발하고 그 성능을 실험으로 입증하였다. 진동흡수장치는 알루미늄 관과 방진고무를 결합하여 평방형 관에 4개의 작동기 시스템으로서 부착되었으며 방진고무의 사용과 제작 형상으로부터 제어기를 가동하지 않았을 때에도 수동적인 진동흡수 효과가 있음을 실험을 통하여 확인할 수 있었다. 본 연구에서는 앞서 수행된 실험결과를 토대로 베이스의 진동에 의한 상부의 진동을 4개의 외관모 형태의 감지기를 이용하여 베이스로부터 전해지는 외부가진을 상쇄할 수 있는 방진시스템을 개발하였다.

본 연구에서 제작된 진동흡수장치는 저주파 미세 진동원을 억제하기 위해 설계되었으며 시스템자체가 가지는 감쇠효과도 효과적임을 알 수 있었다. 실험결과 짧은 시간에 주어지는 외부 충격에 의하여 가진 되는 구조물 진동의 능동진동제어뿐만 아니라 지속적인 외부 교란이 가해지는 구조물 진동의 능동진동제어로써 진동흡수장치가 효과적으로 사용될 수 있음이 확인되었다.

본 연구의 결과를 이용하면 비행체 탑재 장비와 같이 진동에 민감한 정밀 장비를 능동진동제어기법을 적용하여 보호 할 수 있어 비행체의 강인성을 향상시킬 수 있을 것이다. 또한 능동 방진 마운트의 개발은 정밀장비에 영향을 줄 수 있는 미진동을 효과적으로 제어할 수 있을 것이다. 더 나아가 시 손쉽게 활용화할 수 있는 제어회로의 개발은 비행체의 탑재 장비 뿐만 아니라 진동억제를 필요로 하는 자동차, 선박, 항공기, 위성체, 일반가전제품의 진동문제 해결에 큰 도움이 될 것으로 예상된다.

본 연구를 통해 실용화에 가까운 압전형 능동마운드가 개발되었다. 본 장비의 타당성을 입증하기 위해서는 무엇보다도 실험실 환경이 아닌 실제 환경에서의 적용 실험을 수행해야할 것으로 보인다.

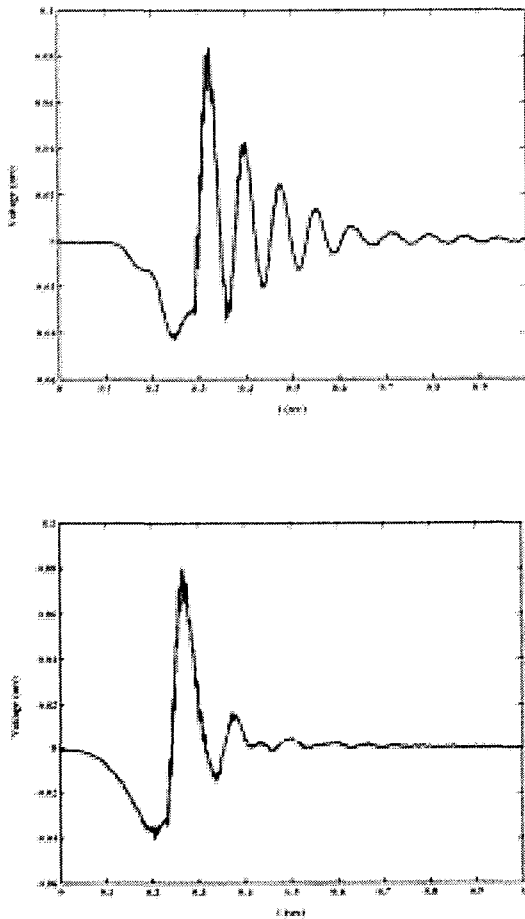


Fig. 6 Response of uncontrol vs. control

Fig. 6은 제어결과를 보여주고 있다. 외부에서의 충격가진에 의하여 감지기신호를 확인한 결과 신호가 작아 프로그램상으로 15배의 증폭을 시켰다. 이로부터 DSP에 다운로드된 디지털화된 IIR제어기를 이용하여 제어가 되는지 확인하였다. 작동기로 입력되는 신호는 증폭앰프를 거쳐 입력되었는데 이때 게인은 10배로 하였다. 실험결과 능동적인 제어가 성공적으로 이루어짐을 확인하였고 동복성실험 결과 첫 번째 고유진동수가 13Hz임을 알 수 있었다.

## 후 기

본 연구는 국방과학연구소 위탁과제(UJ0000038ED)의 지원에 의하여 이루어졌다. 관계자 여러분께 감사 드린다.

## 참 고 문 헌

- [1] D. Karnopp, "Active and Semi-Active Vibration Isolation", Transaction of the ASME, Special 50th Anniversary Design Issue, Vol. 117, 1995, pp.177-185
- [2] D. J. Leo and D. J. Inman, "A Quadratic Programming Approach to the Design of Active-Passive Vibration Isolation System", Journal of Sound and Vibration, Vol. 220, No. 5, 1999, pp.807-825.
- [3] E. Flint, M. Evert, E. Anderson and P. Flannery, "Active/Passive Counter-Force Vibration Control and Isolation Systems", IEEE, 2000, pp.285-298
- [4] Eric T. Falangas, "A Vibration Isolation System Using Active PZT Brackets", Proceedings of the American Control Conference, Baltimore, Maryland, 1994, pp.676-680.
- [5] E. H. Anderson, J. P. Fumo and R. S. Erwin, "Satellite Ultrasonic Isolation Technology Experiment (SUTTE)", IEEE, 2000, pp.299-313.
- [6] Eunsup Sim and Sung W. Lee, "Active Vibration Control of Flexible Structures with Acceleration Feedback", J. GUIDANCE, Vol. 16, No. 2: Engineering Notes